

MODELAGEM MATEMÁTICA DE DESMONTE DE ROCHAS VISANDO A OTIMIZAÇÃO DAS ETAPAS DE BRITAGEM NA MINA DE PITINGA DA MINERAÇÃO TABOCA

Renato J. Costa
Renan C. Candia
Douglas B. Mazzinghy,
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (CPGEM),
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
renato.jacome@yahoo.com.br

RESUMO

O modelamento do desmonte de rochas por explosivos considera parâmetros de entrada como dados de geologia, geotecnia da rocha, de perfuração e desmonte para realização de simulações visando obter a curva granulométrica do ROM. As simulações são fundamentais para obtenção de cenários e maior confiabilidade nas tomadas de decisões. Neste trabalho as simulações foram conduzidas buscando a redução da dimensão do “top size” e consequentemente a redução do tempo de paradas por engaiolamentos e obstrução nas britagens primárias. A Mineração Taboca é uma operação mineira madura e este trabalho trouxe resultados os quais orientaram a operação quanto aos meios para obter melhores resultado na britagem primária.

Palavras-chave: Desmonte de rochas; fragmentação; simulações; foto análises; britagem.

ABSTRACT:

Explosive rock blasting modeling requires input parameters such as rock geology and geotechnical data and drilling and blasting to perform simulations to obtain the ROM particle size distribution. Simulations are critical for obtaining scenarios and greater reliability in decision making. In this work the simulations were conducted aiming to reduce the top size and consequently the reduction of the stop time due to cages and obstruction in the primary crushing. Taboca Mining is a mature mining operation and this work brought results that guided the operation as to the means to obtain better results in the comminution stages.

Keywords: Blasting; fragmentation; simulations; photo analysis; crusher.

INTRODUÇÃO

Mineração Taboca

A lavra da mina de Pitinga, localizado na FIGURA 1 em depósito primário para minério de estanho, é feita em uma rocha granítica de formação rochosa compacta, dura e abrasiva, com a presença de famílias de descontinuidades em várias direções, favorecendo a geração de blocos devido abertura destas fraturas, tornando-se a lavra complexa e de alto custo operacional.

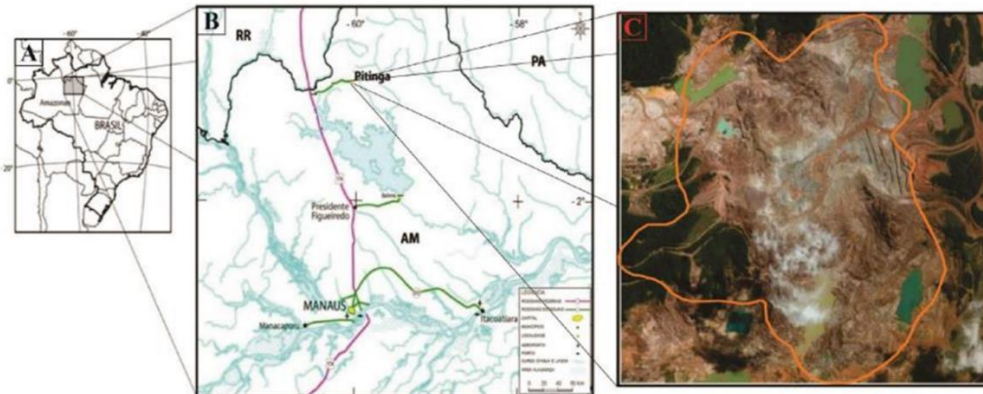


FIGURA 1: Localização da Mina de Pitinga – AM. A) Localização em território nacional. B) Localização no estado do Amazonas e vias de acesso. C) Área de lavra a Céu Aberto (SILVA, 2018).

Esta lavra tem característica por ser seletiva devido a separação de blocos na frente de lavra em função dos portes dos equipamentos e restrições da britagem primária para evitar engaiolamentos e obstruções por blocos, gerando assim refugos de blocos na mina ao entorno da frente de lavra. Em função destes refugos de blocos gerados na mina se faz necessária a utilização contínua de rompedor hidráulico e explosivos encartuchados para a redução dos mesmos em desmontes secundários. Nota-se também que nem sempre os blocos maiores estão na “zona de “tampão”, mas também são provenientes das faces livres e meio das pilhas, sendo denominados “blocos pré-formados”, em função inclusive de danos provocados no maciço devido a abertura das fraturas pré-existentes e das interseções das famílias de descontinuidades presentes no maciço rochoso.

Neste projeto será utilizado princípios de caracterização do maciço rochoso, identificação das famílias de descontinuidades associados aos conceitos gerais de desmontes de rochas por explosivos e cominuição de rochas visando o aumento da produtividade dos processos de mineração e a redução de custos de produção. A pesquisa e a base teórica são fundamentais para associar o modelo Kuz-Ram de fragmentação de desmonte de rochas às práticas adotadas, caracterização do maciço rochoso e suas descontinuidades e associação das técnicas de cominuição que terá grande importância pela complexidade da operação.

Em função do exposto acima, iniciou-se o desenvolvimento de um projeto interno de avaliação de malhas de desmonte e seus efeitos na britagem primária. O efeito das alterações na malha de desmonte seriam avaliados em relação aos custos nos processos operacionais da mina à britagem primária, maximizando a fragmentação na mina para obter a redução de blocos e reduções dos tempos de obstruções nas britagens primárias.

Inicialmente utilizava-se uma malha de 3,40 metros de afastamento por 5,85 metros de espaçamento e foram testadas as malhas de 2,85 x 4,90 m e 3,00 x 5,15 m. Foram mantidos os demais parâmetros de trabalho utilizados para avaliação dos custos nos processos de perfuração e desmonte de rochas, simulações de produtividade e estimativas de redução de custos na britagem primária. Ao longo de 2018 foi sendo utilizada preferencialmente a malha de 3,00 x 5,15 m nos desmontes da Mina de Pitinga e monitorado os resultados. Um trabalho de captação de onda elementar também foi realizado com a utilização de detonadores eletrônicos.

Esse trabalho tem como objetivo a melhoria da fragmentação e redução da quantidade de blocos nos desmontes de rochas por explosivos na Mina de Pitinga, bem como a otimização dos processos de britagens primária e secundária buscando a redução de custos operacionais.

O conceito de otimização do desmonte de rochas para maior eficiência dos processos de cominuição é muito aplicável para minas de rochas compactas e fraturadas. Mostram-se normalmente ganhos ao longo dos processos de mineração como: redução dos custos de desmonte secundários, redução do consumo de energia elétrica nos processos de britagens e moagens, aumento de produtividade de equipamentos de escavação e transporte. Também há aumento de vida útil de revestimento de básculas de caminhão e conchas de escavadeiras, aumento da vida útil da câmara da britagem primária, aumento da vida útil do revestimento da moagem, aumento da taxa de alimentação da britagem e moagem. O resultado inicial foi a redução das dimensões dos blocos na mina e aumento do percentual de finos na alimentação da usina de concentração.

Modelo Kuz-Ram

As propriedades das rochas, as propriedades dos explosivos e as variáveis geométricas do plano de fogo são combinadas usando cinco equações que compõem o modelo de fragmentação Kuz-Ram (MORAIS, 2004).

Equação de Rosin Rammler (1933)

A equação 1 tem o objetivo de determinar a distribuição do tamanho das partículas da rocha fragmentada que pode ser determinada a partir do tamanho médio, se o modelo de quebra é conhecido. O tamanho característico é simplesmente um fator de escala. É a abertura da peneira na qual 63,2% das partículas passam. Se o tamanho característico (X_i) e o índice de uniformidade (n) são conhecidos, então é possível calcular toda a curva granulométrica da detonação (MORAIS, 2004).

$$P_i = 100 \left[1 - e^{-0,693 \left(\frac{x_i}{x_{50}} \right)^n} \right] \quad (1)$$

Sendo: X_i = tamanho da malha da peneira i (mm); X_{50} = tamanho médio da partícula (mm); n = índice de uniformidade (mm); P_i = passante no tamanho X_i (%).

Índice de uniformidade de Cunningham

O índice de Cunningham, equação 2, representa a correlação entre as várias configurações dos planos de fogo e o modelo de fragmentação de rocha (MORAIS, 2004).

$$n = 2,2 - 14 \left(\frac{B}{D} \right) \left[\frac{1+S}{2} \right]^{0,5} \left[\left(1 - \frac{W}{B} \right) \frac{L}{H} \right] P \quad (2)$$

Sendo: B = afastamento (m); S = espaçamento (m); D = diâmetro do furo (mm); W = desvio de perfuração (m); L = comprimento total da carga (m); H = altura do banco (m). Para malha de perfuração quadrada, assume-se P igual a 1,0 e para malha estagiada assume-se P igual a 1,1.

Equação de Kuznetsov

A quantidade de quebra que ocorre com uma conhecida quantidade de energia de um explosivo pode ser estimada usando a equação 3 de Kuznetsov (Morais, 2004). X_{50} foi definido por Cunningham (1987).

$$X_{50} = A K^{-0,8} Q_e^{0,167} \left(\frac{115}{E_r} \right)^{0,633} \quad (3)$$

Sendo: X_{50} = tamanho médio da partícula (cm); A = índice de blastabilidade (fator da rocha); K = razão de carga (kg/m^3); Q_e = massa do explosivo utilizado (kg); E_r = energia relativa em massa (RWS) do explosivo comparada ao ANFO (igual a 100).

Carga de Explosivo

A carga de explosivos no furo é calculada pela equação 4:

$$Q_e = 1000 \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) L \rho_e \quad (4)$$

Sendo: Q_e = massa do explosivo no furo (kg); D = diâmetro do furo (m); L = comprimento da carga (m); ρ_e = densidade do explosivo (t/m^3)

Razão de Carga

A razão de carga é dada pela equação 5:

$$K = \frac{Q_e}{BSH} \quad (5)$$

Sendo: K = razão de carga (kg/m^3); B = afastamento (m); S = espaçamento entre furos (m); H = altura da bancada (m).

Equação de Tidman

A quantidade de energia liberada pelo explosivo, equação 6, é calculada usando a equação de Tidman na Teoria de detonação do explosivo. (Morais, 2004).

$$E_r = \left(\frac{VOD_e}{VOD_n} \right)^2 RWS \quad (6)$$

Sendo: E_r = energia relativa por massa efetiva do explosivo; VOD_e = velocidade de detonação efetiva do explosivo medida em campo (m/s); VOD_n = velocidade de detonação nominal do explosivo (m/s); RWS = energia relativa por massa comparada ao ANFO.

Índice de Blastabilidade (Fator da Rocha)

O fator da rocha é calculado pela equação 7 originalmente desenvolvida por Lilly (1986) e modificada por Cunningham (1987). É usado para ajustar o tamanho médio dos fragmentos baseado no tipo de rocha, direção e mergulho das descontinuidades com relação à frente livre do desmonte. O fator de rocha A é um índice de blastabilidade do maciço rochoso (Morais, 2004). O fator é obtido pela equação:

$$A = 0,06 (RMD + RDI + HF) \quad (7)$$

Sendo: RMD = descrição do maciço rochoso; RDI = índice de densidade de rocha; HF = fator de dureza. O RMD determina a classificação do maciço rochoso como friável, fraturado ou maciço (compacto). Para isto determina-se os seguintes valores para RMD .

TABELA I – Fator utilizado para classificação do maciço rochoso

Friável	10
Fraturado	JF
Maciço	50

Para maciço fraturado o JF é dado pela equação 8:

$$JF = JPS + JPA \quad (8)$$

Para o espaçamento entre as descontinuidades (JPS) observar TABELA II:

TABELA II – Fator utilizado para espaçamentos das descontinuidades

Espaçamento das Descontinuidades	JPS
< 0,10 m	10
Entre 0,10 m a 0,30 m	20
> P	50
0,30 m a 95% P	80

Onde:

$$P = \sqrt{BS} \quad (9)$$

A determinação do JPA (mergulho das descontinuidades) dar-se conforme:

TABELA III – Fator utilizado segundo orientações das descontinuidades

Orientação das Descontinuidades	JPA
Horizontal	10
Mergulhando para fora da face	20
Perpendicular à face livre	30
Mergulhando para dentro da face	40

Cálculo do RDI

$$RDI = 25 \rho - 50 \quad (10)$$

Sendo: ρ = densidade da rocha "in situ".

Cálculo do HF

O HF é determinado em função do módulo de elasticidade da rocha (E), conforme TABELA IV:

TABELA IV – Cálculo de HF segundo módulo de elasticidade:

$E < 50 \text{ GPa}$	$HF = E/3$
$E > 50 \text{ GPa}$	$HF = UCS/5$

Sendo: UCS = Resistência a compressão uniaxial do maciço (MPa).

Energia do Explosivos

$$RWS = \left(\frac{AWS}{AWS_{Anfo}} \right) \times 100 \quad (11)$$

$$RBS = \left(\frac{ABS}{ABS_{Anfo}} \right) \times 100 \quad (12)$$

Sendo: AWS : energia absoluta por unidade de peso do explosivo (cal/g); ABS : energia absoluta por unidade de volume do explosivo (cal/cm³).

$$P_d = d v \quad (13)$$

Sendo: P_d = pressão de detonação; d = densidade média do explosivo; v = velocidade de propagação da detonação.

METODOLOGIA

Neste trabalho as seguintes etapas foram seguidas para a determinação dos planos de detonação e obtenção dos resultados: definição do polígono, caracterização geológica do polígono, caracterização geomecânica do polígono, definição dos parâmetros de desmonte de rochas, definição das malhas de desmonte e simulações, desenho da malha de desmonte e alocação dos furos.

Definição do Polígono

A definição da área de perfuração, denominada polígono, é para delimitar o perímetro ao qual deve-se realizar a alocação dos furos para perfurar e posteriormente desmontá-lo. Nesta etapa é fundamental que o profissional que esteja trabalhando neste planejamento e determine os seguintes indicadores: área a ser desmontada, volume a ser desmontado, determinar o tipo de material, se é minério ou estéril conforme modelo de blocos, teor médio dos elementos aos quais interessam para o empreendimento mineiro, data de necessidade do desmonte.

Caracterização Geológica do Polígono

A caracterização geológica do polígono é importante para conhecer qual ou quais litologias estão presente naquele polígono e as características deste maciço do ponto de vista litológico. Uma vez caracterizado o maciço, o mesmo será subdividido para o dimensionamento de uma malha, conforme parâmetros de desmonte de rochas para obtenção da fragmentação ótima.

Caracterização Geomecânica do Polígono

A caracterização geomecânica do polígono é fundamental para a identificação das famílias de descontinuidades presentes no maciço e no polígono em questão. As famílias de descontinuidades servirão de premissa na seleção do posicionamento da malha de perfuração e, conseqüentemente, obtenção da direção para lançamento do desmonte de modo a obter a melhor fragmentação possível, conforme parâmetros utilizados.

As famílias de descontinuidades podem ajudar ou prejudicar a fragmentação em um desmonte de rochas com explosivos, FIGURA 2 e FIGURA 3. A partir da correta identificação das famílias de descontinuidades, FIGURA 4, e correto posicionamento da malha, a fragmentação pode ser melhor e até permitir o menor consumo de explosivos. Nesta etapa também devem ser identificadas as informações da rocha e suas estruturas que serão pertinentes para determinar a malha para desmontar a rocha e realizar simulações para obter a curva granulométrica teórica ideal.



FIGURA 2 – Tipos de ruptura e setorização por tipos de ruptura e foto mostrando o ar comprimido dissipado pelas fraturas durante a execução da perfuração.

Family	DIP	AZ	Structure's dip	measurements	Spacing (m)
FL1	46	215	SW	27	10
FL2	58	328	NW	10	10
FR1	89	265	N-S (Subvertical)	211	0.4
FR2	38	216	SW	56	4
FR3	66	193	SW	113	0.4
FR4	42	338	NW	88	2
FR5	2	248	Sub-horizontal	80	0.42



FIGURA 3: Tipos de descontinuidades, suas combinações no maciço e foto ilustrando o fraturamento aberto da rocha

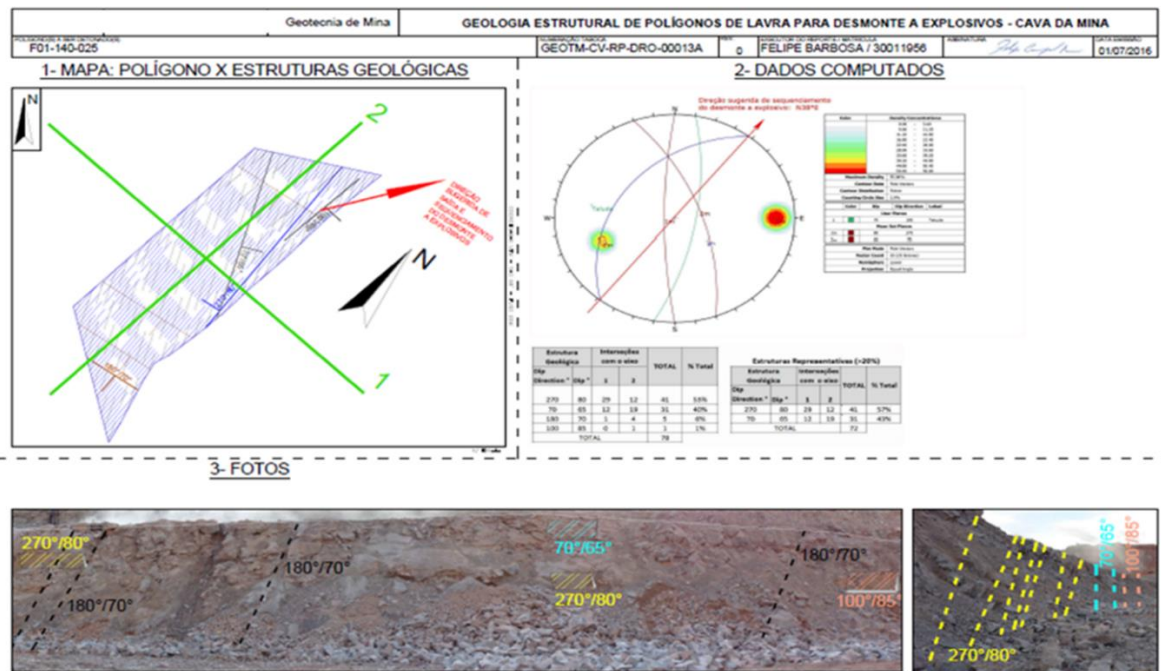


FIGURA 4: Mapeamento das descontinuidades por polígono indicando o melhor direcionamento para maximizar a fragmentação

Definição dos Parâmetros de Desmonte de Rochas

A partir das características e premissas operacionais como tipo do bem mineral, altura de banco, porte dos equipamentos de lavra, abertura máxima do britador primário e curva granulométrica ótima de alimentação, deve-se fazer a seleção dos parâmetros de perfuração e desmonte de rochas como: diâmetro de perfuração e seleção dos tipos de explosivos (explosivos principais, reforçadores, iniciadores, etc).

Em um novo projeto (*greenfield*) tem-se naturalmente mais liberdade para fazer o estudo dos diâmetros adequados, métodos e equipamentos de perfuração, bem como melhor seleção dos explosivos que dará um resultado adequado de fragmentação a um custo competitivo com o processo e bem mineral em questão. Já em um projeto em operação (*brownfield*) nem sempre se tem a oportunidade de trabalhar com os parâmetros mais adequados, pois há recursos disponíveis na operação que nem sempre será os ideais e para mudar irão demandar algum nível de investimento. Neste caso, deve ser feito um estudo para justificar a proposta de alteração e investimento no processo.

Definição das Malhas de Desmonte e Simulações

De posse das informações deve-se nesta etapa, propor as possíveis malhas de desmonte e realizar simulações a partir do modelo Kuz-Ram. Nesta etapa é necessário definir os parâmetros, FIGURA 5:

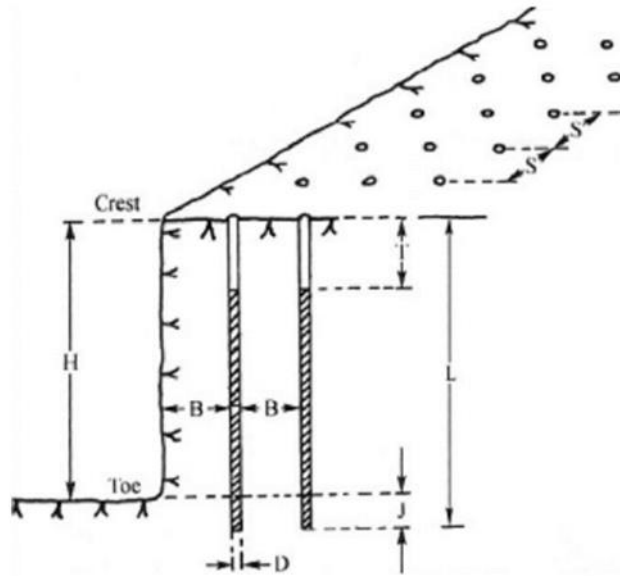


FIGURA 5 – Variáveis geométrica do plano de fogo.

Onde: B = Afastamento; S = Espaçamento; H = Altura do banco; D = Diâmetro do furo; L = Comprimento do Furo; J = Sub-perfuração; T = Comprimento do tampão.

Nas simulações realizadas neste trabalho foram usados os seguintes parâmetros, TABELA V, aplicando as equações fórmulas mencionadas.

Tendo por base as combinações dos modelos de fragmentação de rochas e utilizando as equações mencionadas é possível gerar uma representação gráfica da distribuição granulométrica de fragmentação, FIGURA 6. Na FIGURA 6 é possível identificar as áreas do gráfico que quantifica a distribuição de grossos e a distribuição de finos.

As FIGURAs 7, 8 e 9 representam as simulações utilizando o modelo matemático conforme as variações das malhas de desmonte de rochas utilizadas neste trabalho.

TABELA V: Parâmetros de desmorte utilizados

Índice de Uniformidade n :	Símbolo	Unidade	Valor
Tipo da Malha	P	-	1,1
Diâmetro do furo	D	mm	171,45
Afastamento	B	m	3,00
Espaçamento	S	m	5,15
Desvio da perfuração	W	m	0,1
Comprimento da carga	L	m	9
Altura da bancada	H	m	10
Índice de Uniformidade	n	-	2,18
RMD - JF Rocha fraturada			70
Densidade da Rocha	ρ	g/cm ³	2,64
RDI			16
UCS			244
HF			48,8
Fator da Rocha	A	-	8,09
Densidade do Explosivo		t/m ³	1,2
Massa do Explosivo	Qe	kg/furo	249,34
Razão de Carga	K	kg/m ³	1,614
Razão de Carga	K	g/t	611,3
Velocidade de Detonação Efetiva	VODe	m/s	5716
Velocidade de Detonação Nominal	VODn	m/s	4975
RWS	RWS	%	99
Energia Relativa por Massa de Explosivo em relação ao ANFO	Er	%	130,69
Tamanho Médio	X50	cm	12,78
Tamanho Médio	X50	mm	127,84

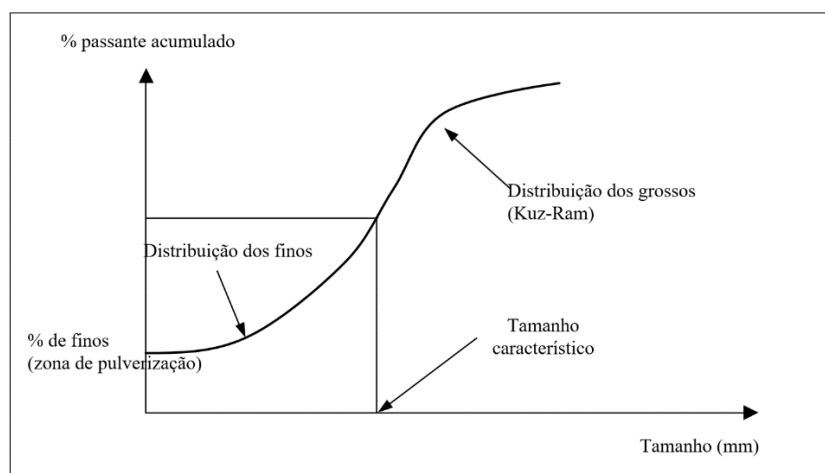


FIGURA 6 – Distribuição de tamanho de finos e grosso de ROM (MORAIS, 2004)

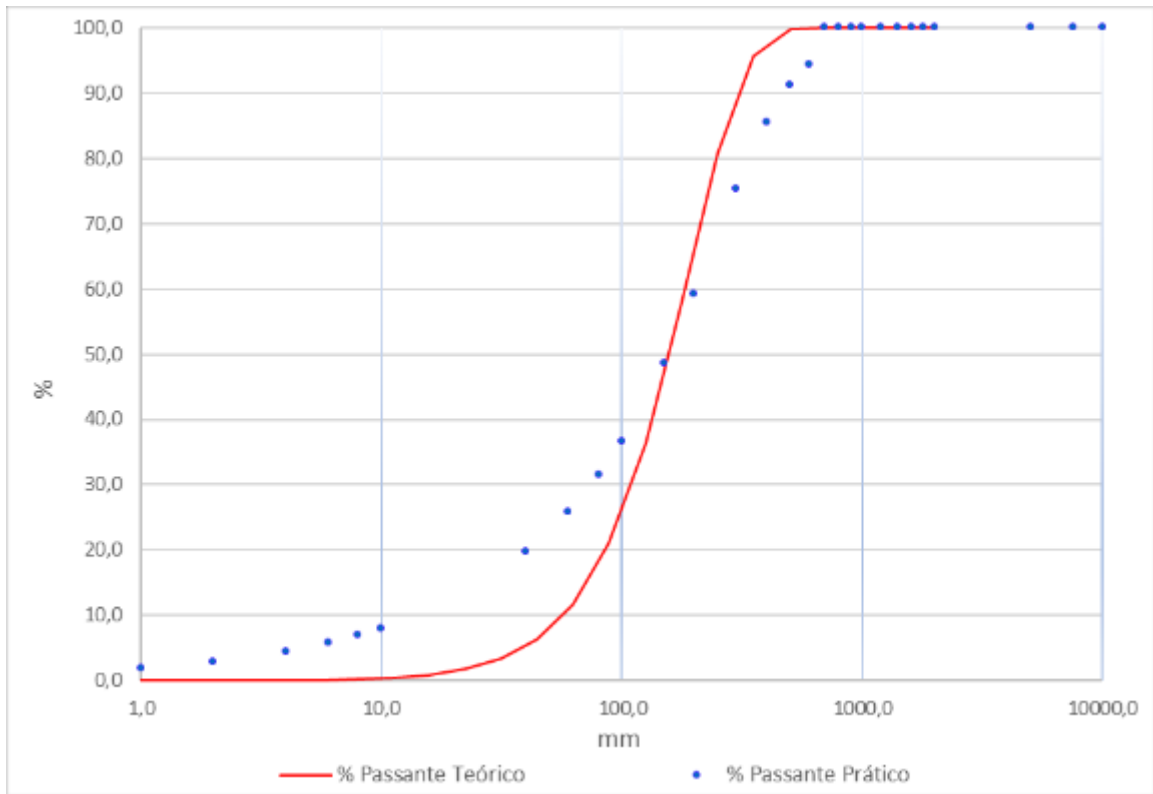


FIGURA 7: Simulação malha baseline 3,40 m x 5,85 m

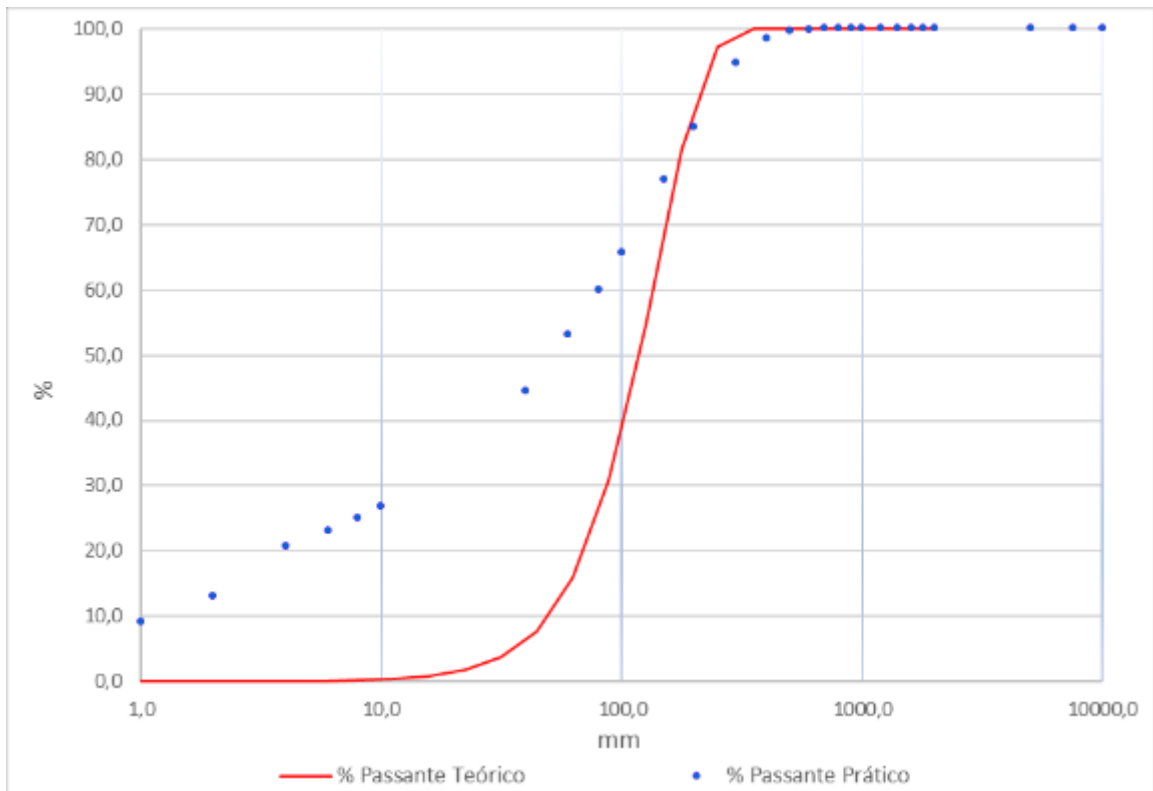


FIGURA 8: Simulação malha 2,85 m x 4,90 m

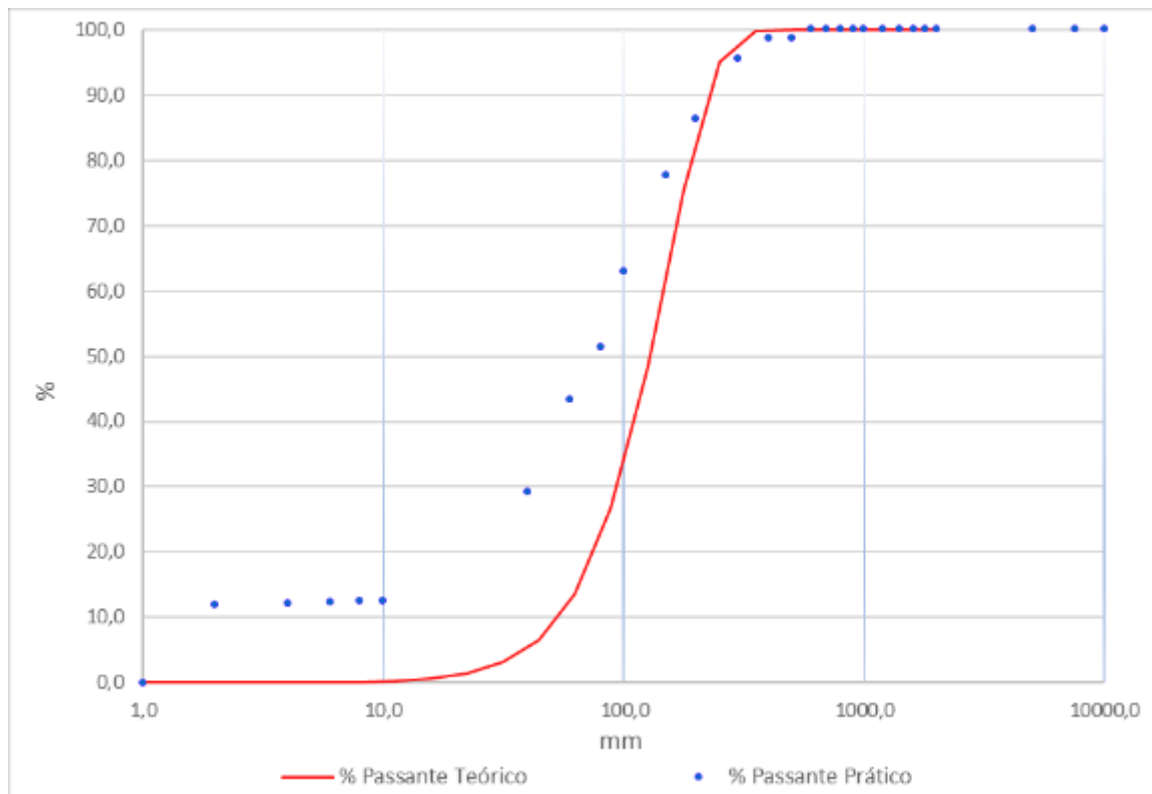


FIGURA 9: Simulação malha 3,00 m x 5,15 m

Foram realizadas as simulações utilizando o modelo matemático conforme as variações das malhas de desmonte de rochas utilizadas neste trabalho. Foram realizados vários cenários, avaliados e obtiveram as variações das curvas granulométricas utilizando o modelo matemático. Com base nestas simulações foi possível gerar uma curva demonstrando o comportamento do P_{80} e P_{100} conforme diferentes malhas utilizadas.

Caso haja nos polígonos variações significativas em litologia e geomecânicas das rochas, deve ser analisado quais e quantos tipos de malhas deverão ser trabalhados de forma a otimizar os custos e maximizar os resultados de fragmentação. Em operações que haja informações, dados confiáveis, aconselha-se realizar um estudo para estabelecer a curva de desmonte para a Mina de Pitinga.

A curva de desmonte da Mina de Pitinga é a uma análise gráfica a qual correlaciona os custos dos principais processos operacionais com as variações dos parâmetros de desmonte de afastamento (B) e espaçamento (S).

Desenho da Malha de Desmonte e alocação dos furos

Após cumprida as etapas anteriores a malha de perfuração deve ser desenhada em algum *software* que permita obter informações de “X” e “Y” (colar do furo) e “Z” (profundidade objetiva do furo). As alocações destes furos em campo devem ser feitas utilizando recursos como, topografia de alta precisão ou importado em sistemas embarcados de navegação de perfuração por GPS (*Global Position System*), o qual permite a visualização e posicionamento preciso dos furos.

Perfuração do Polígono

Uma vez marcado em campo ou disponibilizado o projeto de perfuração importado nos equipamentos deve-se iniciar a perfuração propriamente dita. Nesta etapa devem-se coletar o máximo de informações durante a perfuração para identificar transições de rochas com diferentes resistências, conforme parâmetros de perfuração utilizados. No mercado há sistemas que permitem, de forma automática, a identificação e registro das diferentes transições de rochas e coleta destes dados como premissa para a elaboração do plano de

fogo ou plano de carregamento de explosivos. Uma reconciliação entre planejado e executado deve ser feita nesta etapa para verificação da aderência.

Carregamento de Explosivos e Temporização dos furos

Uma vez realizada a perfuração programada deve-se realizar a conferência de todas as profundidades dos furos e realizar o plano de carregamento. Neste plano deve-se contemplar todos os detalhes de carregamento com explosivos citados anteriormente e entregue ao Blaster, responsável pelo carregamento e detonação. Nos planos de fogos devem contemplar também as sequencias planejada de saída dos furos com as respectivas temporizações. Quando determinado o plano de fogo deve-se iniciar o carregamento de explosivos com os recursos existentes e registrados os dados executados para serem feitas reconciliações entre planejado e executado nesta etapa. Após o carregamento dos explosivos devem ser feitos as conexões dos furos utilizando os acessórios iniciadores não-elétrico ou as temporizações utilizando acessórios iniciadores eletrônicos. Nesta etapa é fundamental que haja previamente o Estudo Elementar de Ondas, para orientar qual a melhor temporização para se obter reduzido dano ao maciço, menor vibração nas áreas adjacentes, comunidade, estruturas e melhor resultado de fragmentação.

Detonação

Nesta etapa deve-se tomar todo o cuidado, pois é um momento de grande ansiedade das pessoas envolvidas, muito em função dos riscos. Normas brasileiras específicas para desmonte de rochas devem ser seguidas para esta etapa.

Monitoramento e Análises dos Resultados

Os parâmetros de desmontes de rochas deve ser sempre analisado e testado, pois o mesmo é sempre empírico, ou seja, é necessário serem determinados e testados para confirmação dos resultados e para isto é fundamental o seu monitoramento.

Os monitoramentos mais importantes são:

- Perfilagens através de laser profile ou BoreTrack;
- Sismografia em pontos chaves;
- Medições de VOD (velocity of detonation);
- Análise de granulometria média do desmonte.

A partir destes monitoramentos, dentre outros, é possível obter e analisar os dados dos desmontes para propor novos testes, novos padrões e verificar qual é a melhor opção para a lavra em questão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caso Base

Em 2017 a Mina de Pitinga praticava uma malha de desmonte com os parâmetros de 3,40 metros de afastamento e 5,85 metros de espaçamento com a qual era possível obter um P_{80} de 400 a 450 mm. Buscando uma melhor fragmentação e diminuição das frações grosseiras foram planejados desmontes testes com malhas mais adensadas. O primeiro, realizado no mês de novembro de 2017, foi previsto utilizar uma malha de 14 metros quadrados com os parâmetros de 2,85 metros de afastamento por 4,90 metros de espaçamento. O segundo teste, realizado em dezembro de 2017, utilizou uma malha intermediária à primeira malha teste com 15 metros quadrados, sendo 3,0 metros de afastamento e 5,15 metros de espaçamento, mantendo o diâmetro de perfuração de 171 mm e demais parâmetros de desmonte de rochas constantes.

O modelo Kuz-Ram foi utilizado para simular as malhas de desmorte variando o afastamento e o espaçamento testados em campo. A partir de análises granulométricas dos desmortes, realizadas através de foto análises, utilizando *software* específico *WipFrag*, foi possível verificar a aderência do modelo aos dados experimentais. Como de prática, para o desenvolvimento dos projetos de perfuração, primeiramente é definido a área de lavra, seu sequenciamento e a definição do polígono pela equipe de planejamento de lavra, o qual são utilizadas as seguintes premissas: área do polígono (área a ser detonada), volume do polígono, quantidade de furos, massa total a ser desmontada, teor médio. Com o polígono definido é elaborado o projeto de perfuração, conforme as seguintes premissas de desmorte: afastamento, espaçamento, sub-perfuração, over-break estimado, smooth blasting adotado. Na Taboca utilizam-se apenas uma malha para o desmorte de produção. Nos desmortes em Pitinga é utilizada perfuração de 6 ¾" de diâmetro, com carregamento de explosivos do tipo heavy ANFO, 70/30 a uma densidade de 1,20 t/m³. É utilizada uma malha estagiada e uma razão E/A de 1,72. Esta razão tem o objetivo de permitir o lançamento maior da pilha mitigando a geração de blocos e sobre-pisos nas praças.

A operação de desmorte na Taboca encontrou na técnica de amortecimento dos impactos no talude, *Smooth Blasting*, uma boa opção para controle de sobre-quebra, "overbreak", em finais de desmorte, redução de danos e preservação de bermas, FIGURA 10. São parâmetros especiais utilizados sendo atualmente considerado 3,80 metros de afastamento e 3,04 metros de espaçamento.



FIGURA 10 - Desmorte utilizando a técnica *Smooth Blasting*

Quando o contorno é detonado depois dos furos de produção, espaçamento e afastamento podem ser calculados usando a equação 14 (*Tamrock*, 1988):

$$E = 15 a 20 d \quad (14)$$

Sendo: E = espaçamento (mm); d = diâmetro do furo (mm).

A FIGURA 11 representa o perfil de carregamento de explosivos dos furos de produção e furos de contorno (*Smooth Blasting*).

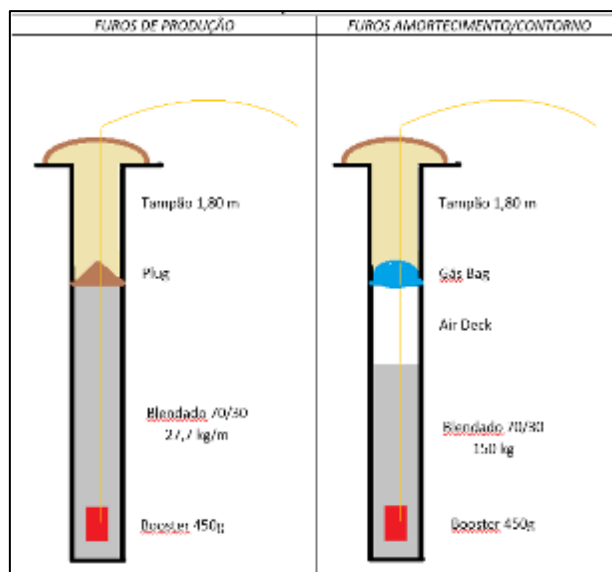


FIGURA 11 - Desmorte utilizando a técnica *Smooth Blasting*

Na utilização de detonadores pirotécnicos as temporizações são de 17 milissegundos (ms) entre furos e de 42 ms entre linhas. Esta temporização permitiu o melhor lançamento e formação de pilha dos desmortes. Para os furos da linha de contorno, (*smooth blasting*) são utilizados tempos individuais com 100 ms após a iniciação do furo anterior de produção mais próximos.

Buscando realizar os monitoramentos dos resultados dos desmortes a Taboca realiza continuamente as análises granulométricas dos fogos com as quais são acompanhadas as evoluções do P_{80} , tamanho do conjunto de partículas (em milímetros) que corresponde a 80% passante nesta malha. Estas análises são realizadas através de *softwares* específicos de análise granulométrica realizados pelas análises de imagens (foto análises) com auxílio de referenciais que indicam um tamanho para servir como escala. Para realizar estas análises utilizam-se os *softwares WipFrag desktop* e *WipFrag IOS* através de um *tablet*.

Este é um método de análise bem conhecido e utilizado no mercado, porém possui erros no processo de obtenção e tratamento das imagens, que são inerentes ao processo e técnicas são adotadas durante o processo de fotografia e análises para mitigar estes erros. Apesar dos erros, é um método bastante utilizado mundialmente, relativamente de baixo custo e que permite rapidamente correlacionar os resultados obtidos, comparar os diferentes padrões e tomar decisões.

Nos desmortes testes foram realizadas todas as preparações dos polígonos e áreas desmontadas com a adequada limpeza da frente, incluindo o pé, irregularidade do piso, evidenciando uma boa condição de face livre para projeção do material. Com estes resultados de granulometria do material foi possível realizar simulações de custos, ganhos operacionais de mina e produtividade dos processos de britagens e rebritagens.

Conforme evolução dos custos obtidos nas simulações do desmorte chega-se à conclusão que entre as malhas de 2,85 x 4,90 m e a malha de 3,00 x 5,15 m é o ponto ótimo. Nesta fração estabelece-se o limite entre compensar financeiramente ou não a alteração de malha, visando a compensação dos custos nos processos subsequentes em função do aumento de custos em perfuração e desmorte.

Realizando simulações em função das curvas granulométricas obtidas pode-se elevar a produtividade da rebritagem em até 27%. Em função dos resultados obtidos nas simulações e estudos decidiu-se operacionalizar a malha de 3,0 x 5,15 m para apurar os ganhos.

1ª Malha Teste:

Primeiramente foi realizado um teste com a malha de com 2,85 x 4,90 m em um polígono denominado F01_150_007.

A direção projetada da face livre, coincidentemente é a direção em geral que se obtém resultados satisfatórios de fragmentação e preservação da parede do banco em função do conjunto das famílias de descontinuidades. Neste desmonte foi realizada a temporização padrão da Mina de Pitinga com iniciadores não-elétricos, utilizando tempos de 17 milissegundos (ms) entre furos, 42 ms entre linhas e 100 ms entre a linha de produção e a linha de amortecimento de ondas (Smooth Blast). É possível verificar uma boa formação de pilha no desmonte, bom lançamento, bom descolamento da parede final, boa granulometria do desmonte e melhor homogeneidade de fragmentação em relação aos desmontes anteriores.

Para registro da granulometria do material deste desmonte foram utilizados dois softwares com o mesmo método de análise, o WipFrag IOS pela Taboca e o Split Desktop pela Enaex Britanite, ambos utilizando o método de foto análise. No total foram realizadas 23 análises, o que possibilitou gerar a curva média do desmonte com $P_{80} = 166\text{mm}$ e $P_{100} = 619\text{mm}$, FIGURA 12. O desmonte do polígono F01_150_007 teve uma redução de granulometria de 54,4% no P_{80} e 27,4% no P_{100} . Não foi possível avaliar estes ganhos ao longo dos processos subsequentes por ter sido apenas um desmonte, entretanto, foi importante e possível identificar ganhos pontuais em menor tempo de escavação, menor geração de blocos, aumento de taxa na britagem primária e necessidade de menor enchimento das caçambas dos caminhões.

2ª Malha Teste:

Após o teste da 1ª nova malha com 14 metros quadrados e apurados os resultados, decidiu-se por realizar uma malha intermediária à primeira com 3,00 x 5,15 m, e também realizar a verificação dos resultados. Para esta malha foi desenvolvido o projeto F01_150_010 e mantido todos os demais parâmetros.

Curvas de desmonte

Após os testes realizados foram apurados os resultados, $P_{80} = 167\text{mm}$ e $P_{80} = 168\text{mm}$, respectivamente, para a primeira e segunda malha proposta. Os resultados das malhas foram semelhantes às porções maiores de 65%, mas para granulometria menores que este percentual a malha de 2,85 x 4,90 m apresentou maior percentual de finos.

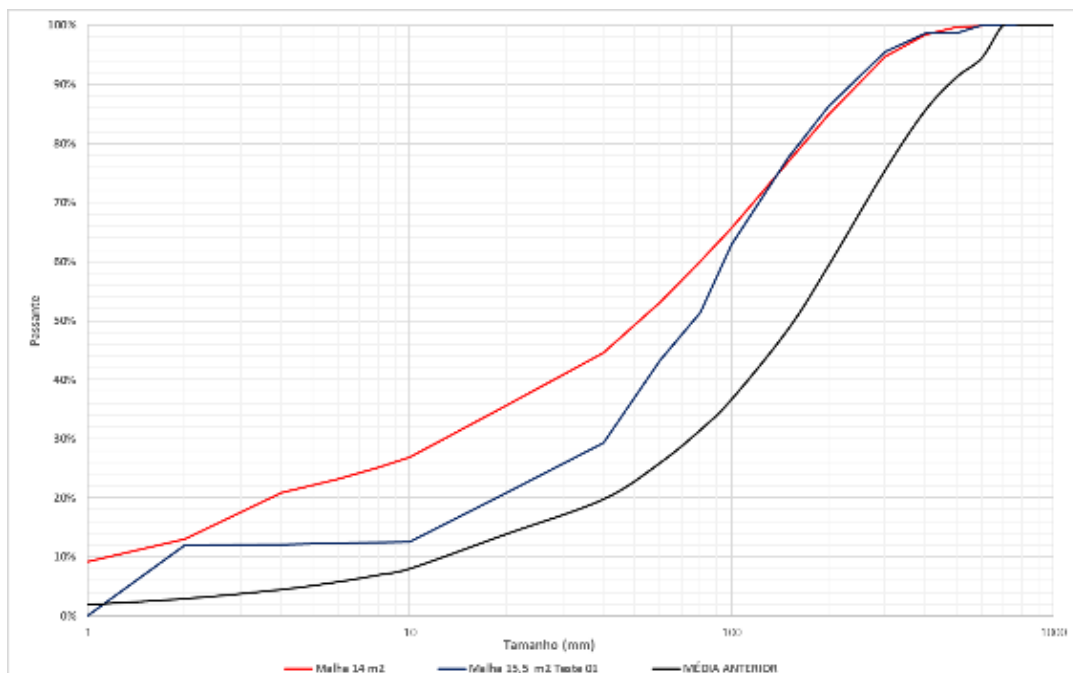


FIGURA 12 - Análise granulométrica detalhada e média do polígono F01_150_010

Com estes resultados de granulometria do material, demonstrado na FIGURA 12, foi possível realizar simulações de custos e estimar ganhos operacionais de mina e produtividades dos processos de britagens e rebritagens. Praticando a malha de 2,85 x 4,90 m estimou-se um acréscimo de aproximadamente 23% ao ano nos custos dos processos de perfuração e desmonte e estimou-se um retorno de 12% abaixo dos gastos previstos. Praticando a malha de 3,0 x 5,15 m calculou-se um acréscimo anual de aproximadamente 16,2% nos custos dos processos de perfuração e desmonte e estimou-se um retorno em outros processos de 10% acima deste valor por ano.

A evolução dos custos foi conforme variação de malhas e concluiu-se que entre a primeira e segunda malha proposta um ponto intermediário entre elas é o ponto ótimo que estabelece o limite entre compensar financeiramente ou não o adensamento de malhas, visando a compensação dos custos nos processos subsequentes em função do aumento de custos em perfuração e desmonte. Em função dos resultados obtidos nas simulações e testes iniciais decidiu-se operacionalizar a malha do 2º teste e 15,5 m², 3,00 x 5,15 m entre furos e apurar os resultados. A malha foi operacionalizada inicialmente por 3 meses e confirmou-se os resultados em fragmentação de 54,4% no P_{80} e 27,4% no P_{100} . Ao longo de 2018 a malha do 2º teste 3,00 x 5,15 m entre furos foi realizada por várias vezes permitindo um resultado satisfatório de P_{80} . Praticando a malha mais fechada que 3,00 x 5,15 m mesmo havendo algumas variações durante o período, o P_{80} médio obtido através das análises granulométricas, pelo método de foto análise, permaneceu entre 197 e 249 mm. Neste período avaliado o tempo de obstrução da britagem primária diminuiu em relação ao tempo obtido com a malha anterior no período de *baseline*.

Geração de ondas de curto campo

Buscando maximizar a fragmentação de rochas da Mina de Pitinga e aplicar os melhores tempos objetivando a melhor fragmentação de rocha foram aplicados os detonadores eletrônicos. Manteve-se a malha de 3,00 x 5,15 m. Para determinar as temporizações mais adequadas para a rocha desta mina foi aplicada a metodologia de campo curto demonstrado na FIGURA 13:

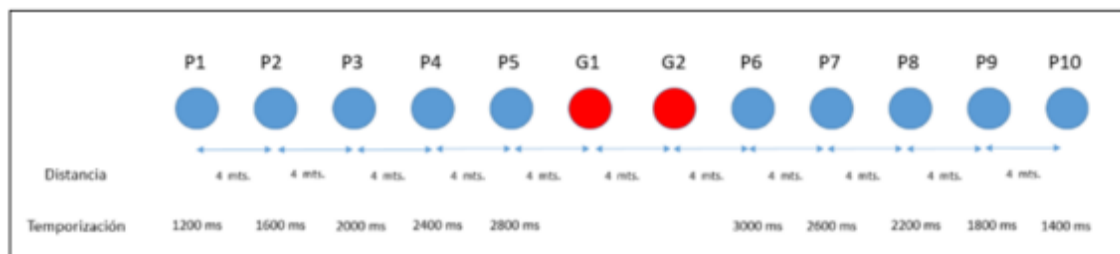


FIGURA 13: Perfuração e plano de carregamento para captação de campo curto

Foram perfurados 12 furos com 4 metros de espaçamento sendo que os 02 centrais foram instalados geofones para a captação das ondas e os demais furos carregados e detonados a cada 400 milissegundos da extremidade para o centro em direção dos geofones. Utilizando *software* específico foi realizado o planejamento do desmonte de rochas conforme FIGURA 14.

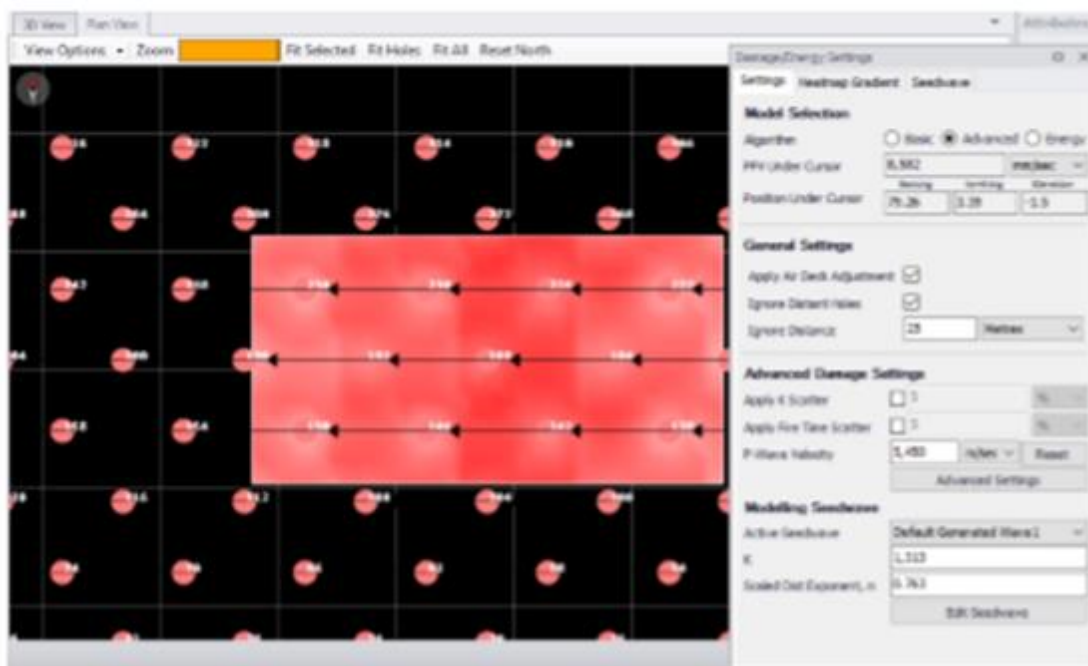


FIGURA 14: Plano de fogo

Após a detonação, demonstrado na TABELA VI, de acordo com a captação das ondas pelos geofones, foi possível identificar a relação de velocidade de partícula (PPV) e vibração.

TABELA VI: Nível de vibração conforme velocidade de partícula

Nível de Pertubação	Vibração (mm/s)	Relação PPV	Zona
Pulverização	13353	8*PPV Crítico	1
Dano notorio (Fratramento intenso)	6676	4*PPV Crítico	2-3
Aprição de novas gretas	1.699	PPV Crítico	4
Dilatação de fracturas	417	¼ PPV Crítico	5

Na TABELA VII é possível identificar o tipo de iniciação com o nível de velocidade de partícula em PPV.

TABELA VII: Diferença entre iniciação convencional e eletrônica

Iniciação	PPV (mm/s) Setor tampão (1,5m)	PPV (mm/s) Setor centro (6m)
Pirotécnica (17ms/42 ms)	4825	6227
Electrônica (4ms/42 ms)	8582	10282

Percebe-se conforme TABELA VII a diferença entre a velocidade de partícula da iniciação pirotécnica e a iniciação eletrônica. Esta diferença é expressiva para níveis de fragmentação de rocha, mas é importante identificar corretamente as variações do maciço rochoso.

Demonstrado na FIGURA 15, a diferença entre os resultados da fragmentação eletrônica e a pirotécnica representaram uma melhoria na fragmentação em 18%.

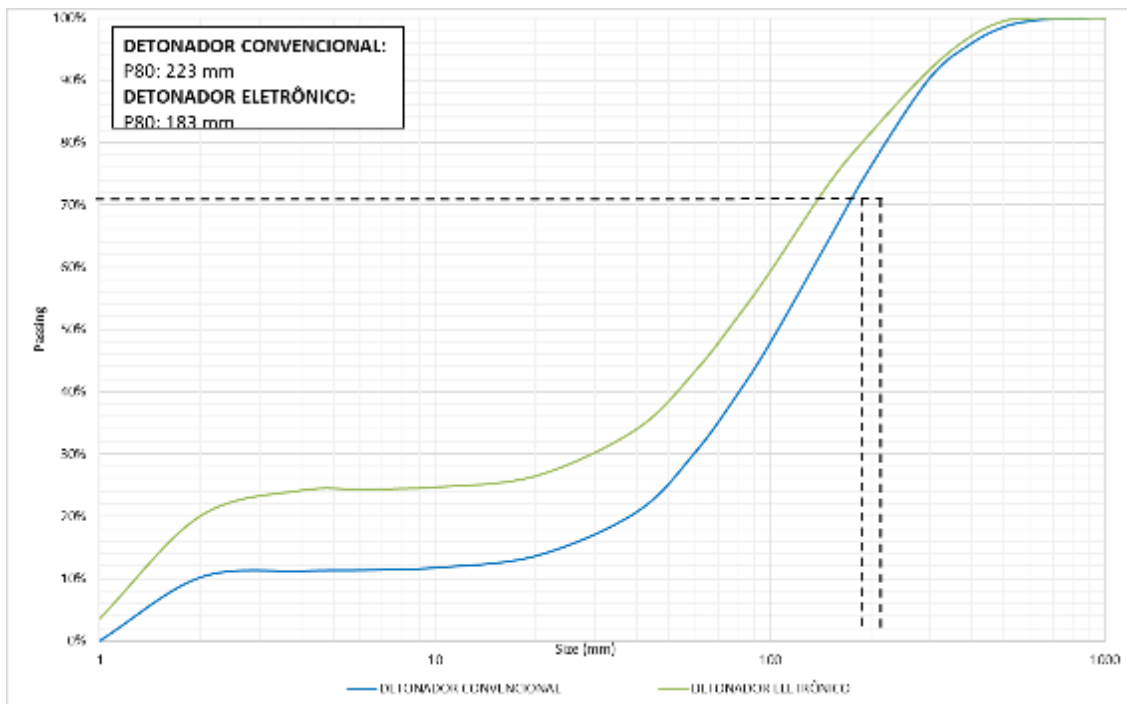


FIGURA 15: Comparativo entre fragmentação utilizando iniciadores eletrônicos e pirotécnicos

CONCLUSÕES

A alteração da malha foi um passo importante para melhoria dos desmontes de rochas na mina de Pitinga. A geração de blocos maiores que 80% da fração granulométrica acima de 400 milímetros também são influenciados por fatores além da malha do polígono, sendo os principais: conjunto de fraturamento da rocha, geometria do polígono, direcionamento da face livre, condições das faces livre, temporização dos furos, qualidade da perfuração e qualidade do desmonte.

A alteração da malha para 3,00 x 5,15 m visivelmente gerou blocos de menores dimensões que os blocos utilizando a malha de 3,40 x 5,85 m, mas também se percebeu que a lavra ficou mais seletiva e blocos que anteriormente eram transportados para a britagem passaram a permanecer na mina. Além da influência na dimensão dos blocos houve também aumento do percentual de finos.

O conceito de otimização do desmonte de rochas para maior eficiência dos processos de cominuição é muito aplicável para minas de rochas compactas e fraturadas. Mostram-se normalmente ganhos ao longo dos processos de mineração como: redução dos custos de desmonte secundários, redução do consumo de energia elétrica nos processos de britagens e moagens, aumento de produtividade de equipamentos de escavação e transporte. Também há aumento de vida útil de revestimento de básculas de caminhão e conchas de escavadeiras, aumento da vida útil da câmara da britagem primária, aumento da vida útil do revestimento da moagem, aumento da taxa de alimentação da britagem e moagem. O resultado inicial foi a redução das dimensões dos blocos na mina e aumento do percentual de finos na alimentação da usina de concentração.

Como este é um trabalho que necessita maior estabilidade do processo, é necessário continuar as avaliações de desempenho para certificar qual é o impacto no consumo de energia elétrica e no desempenho da vida útil dos materiais de revestimento da britagem primária e britagem secundária. O principal impacto até o presente momento é a redução das dimensões dos blocos na mina, aumento do percentual de finos na alimentação da usina de

concentração e redução de paradas por “engaiolamento” e obstrução da câmara da britagem primária. O trabalho de ondas de curto campo foi muito importante para identificar a evolução do iniciador convencional e iniciador eletrônico. Em muitas aplicações com detonadores eletrônicos a medição das ondas de curto campo não é levada em consideração e assim não se maximiza o resultado na fragmentação.

REFERÊNCIAS

Cunningham, C.V.B., Bedser, G. & Bosman H. G., Production blasting with electronic delay detonators at Peak quarry, 1998.

Cunningham, C.V.B. The effect of timing precision on control of blasting effects, 2000.

Cunningham, C.V.B. The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on: Brighton Conference Proceedings, 2005

Morais, J. L. Simulação da Fragmentação dos Desmontes de Rochas por Explosivos. Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. (Tese de Doutorado em Engenharia de Minas).

Silva, A. C. Estilo de Ocorrências de Minerais Portadores de ETRs no Albita Granito da Suíte Madeira: Pitinga, AM, 2018.

Tamrock Trackdrills. Surface Drilling and Blasting, Southeast Europe. 1988.